На правах рукописи

Amust

### КУЛИКОВСКАЯ Анна Алексеевна

# Поиск процессов перезарядки нуклонов при фрагментации ионов углерода при энергии 300 МэВ/нуклон

Специальность: 1.3.15. — Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»)

| Научный                   | Мартемьянов Максим Александрович<br>кандидат физико-математических наук, старший<br>научный сотрудник Курчатовского комплекса<br>теоретической и экспериментальной физики НИЦ<br>«Курчатовский институт», г. Москва. |  |  |  |  |
|---------------------------|--|--|--|--|--|
| руководитель:             |  |  |  |  |  |
| Официальные<br>оппоненты: | Зарубин Павел Игоревич<br>доктор физико-математических наук, начальник   |  |  |  |  |
|                           | сектора №4 обработки толстослойных эмульсий<br>Объединённого института ядерных исследований,<br>г. Дубна;  |  |  |  |  |
|                           | Окороков Виталий Алексеевич<br>доктор физико-математических наук, доцент,<br>профессор кафедры физики №23 Института общей  |  |  |  |  |

профессор кафедры физики №23 Института общей профессиональной подготовки Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Москва.

Ведущая Институт ядерных исследований (ИЯИ) РАН, г. Москва. организация:

Защита диссертации состоится 20 марта 2024 г., начало в 15.00, на заседании диссертационного совета 02.1.003.05 на базе НИЦ «Курчатовский институт» по адресу: 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте www.nrcki.ru

Автореферат разослан «\_\_\_\_» \_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета д.ф.-м.н., доц.

5.052

А.Л. Барабанов

#### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

#### Актуальность темы диссертации

Исследование механизмов ядро-ядерных взаимодействий является одним из важных направлений современной ядерной физики. Большим успехом в этом направлении был синтез около двух тысяч не встречающихся в природе нуклидов, что существенно расширило наше представление о природе ядерной материи. В кроме изучения фундаментальных основ последние годы, ядро-ядерных взаимодействий, большое внимание уделяется и вопросам феноменологически точного описания таких процессов, необходимого в прикладных областях, таких, как тяжелоионная терапия, расчеты радиационной защиты и формирование пучков Это радиоактивных ионов. также стимулировало создание полуфеноменологических программ моделирования ядро-ядерных взаимодействий, которые требуют как экспериментальной проверки, так и совершенствования базовых подходов данных программ. Одной из целей эксперимента ФРАГМ [1-3], проведенного на тяжелоионном комплексе ТВН [4], являлось получение высокоточных данных по фрагментации ионов в области энергий, доступных на этом ускорителе. В рамках эксперимента был проведен набор данных по фрагментации ионов углерода на мишенях от бериллия до тантала как в широком диапазоне кинетических энергий налетающего ядра от 0.3 до 3.2 ГэВ/нуклон, так и в широкой области энергий полученных фрагментов от изотопов водорода до изотопов налетающего ядра углерода. Одним из слабоизученных процессов, которому посвящена настоящая диссертация, является процесс перезарядки нуклонов при фрагментации ионов углерода. Он приводит к увеличению числа протонов или нейтронов в образовавшемся фрагменте по сравнению с налетающим ядром.

Теоретическое описание данных процессов основано на мезонном обмене между нуклонами налетающего ядра и ядра мишени. Неупругое взаимодействие нуклонов сопровождается рождением резонансных состояний и заряженных мезонов.

Зарядово-обменные реакции служат инструментом для изучения довольно широкого спектра физических задач. Соответствующие экспериментальные данные важны для оценки роли мезонных обменов, нуклон-нуклонных корреляций, модификации барионных резонансов в ядерной среде, спин-изоспиновых ядерных возбуждений, а также необходимы для вычисления ядерных матричных элементов гипотетического безнейтринного двойного бета-распада [5]. Механизм зарядового обмена между нуклонами является также перспективным методом для синтезирования ядер, далеких от стабильности, и гиперядер [6].

3

Помимо практической ценности новых данных по реакциям, идущим с перезарядкой нуклонов, и пополнении ими экспериментальных баз данных, исследование таких реакций является хорошим тестом различных моделей ядроядерных взаимодействий и позволяет как выявить их недостатки и преимущества, так и указать пути совершенствования этих моделей. Следует отметить, что реакции, идущие с перезарядкой, имеют малые сечения по сравнению с выходами других фрагментов и узкие импульсные распределения в области квазиупругого взаимодействия нуклонов. Поэтому для измерения таких реакций требуется высокое импульсное разрешение, которое и было реализовано на детекторе ФРАГМ.

#### Цели и задачи исследования

Целью диссертационной работы является поиск реакций, идущих с перезарядкой нуклонов в процессе фрагментации ядер углерода при энергии 300 МэВ/нуклон. Соответствующие экспериментальные данные были получены на детекторе ФРАГМ. Исследовалась реакция <sup>9</sup>Ве ( $^{12}$ C, f) X, где f – искомые изотопы: <sup>12</sup>Ве и <sup>12</sup>N. Проводился поиск указанных изотопов, расчет  $^{11}$ Be,  $^{12}$ B. дифференциальных сечений их выходов в зависимости от импульса, а также полученных данных с различными моделями сравнение ядро-ядерных взаимодействий, другими экспериментальными результатами и статистическими моделями на предмет их согласия.

Для достижения поставленных целей были сформулированы следующие задачи:

- Создание алгоритма для поиска изотопов бериллия и бора по корреляционным распределениям времени пролета и амплитуды сигнала при различных настройках магнито-оптического канала по жесткости. Изучение реакций, идущих без перезарядки нуклонов, необходимо для тестирования методики выделения фрагментов;
- 2. Разработка метода анализа информации, поступившей с годоскопической системы, необходимого для отбора реакций, идущих с перезарядкой, и значительного улучшения точности измерения импульса фрагмента;
- 3. Вычисление эффективности регистрации ионов бериллия и бора на основе программы моделирования эксперимента, базирующейся на программном пакете Geant4 [7];
- 4. Вычисление дифференциальных сечений реакций, протекающих с перезарядкой нуклонов, в зависимости от импульса фрагмента с учетом моделированной эффективности регистрации фрагментов;
- 5. Расчеты в рамках различных моделей ядро-ядерных взаимодействий дифференциальных сечений реакций, протекающих с перезарядкой нуклонов;

- 6. Оценка согласованности модельных данных по ядро-ядерным столкновениям как друг с другом, так и с экспериментом, с точки зрения исследуемых реакций, определение недостатков и преимуществ моделей;
- 7. Анализ импульсных спектров широкого набора изотопов бора и бериллия с целью контроля корректности вычислений дифференциальных сечений реакций, идущих с перезарядкой.

#### Научная новизна работы

- Впервые были обнаружены изотопы <sup>11</sup>Ве, <sup>12</sup>В, <sup>12</sup>Ве в реакциях перезарядки нуклонов при фрагментации ядер углерода с энергией 300 МэВ/нуклон и измерены их дифференциальные сечения рождения;
- Были расширены возможности метода идентификации фрагментов на основе анализа корреляционных распределений времени пролета и ионизационных потерь в сцинтилляционных детекторах установки ФРАГМ за счет привлечения координатной информации, полученной с помощью годоскопической системы;
- Впервые было произведено сравнение форм импульсных спектров широкого диапазона изотопов бериллия и бора с предсказаниями статистических моделей при энергии 300 МэВ/нуклон;
- Было получено верхнее ограничение на сечение образования изотопа <sup>12</sup>N в основном состоянии по отношению к выходу изотопа <sup>12</sup>B.

#### Практическая значимость работы

Практическая значимость данного исследования состоит в получении новых данных о фрагментации ядер углерода, происходящей с перезарядкой нуклонов. Этот процесс выходит за рамки традиционно используемых термодинамических и статистических подходов к фрагментации и связан с проявлением мезонных степеней свободы в ядерных силах, включая модификацию барионных резонансов в ядерной материи. Полученные экспериментальные данные расширяют базу данных по ядро-ядерным взаимодействиям, что является необходимым для тестирования моделей, позволяет расширить круг описываемых ими процессов и будет содействовать их совершенствованию.

## Степень обоснованности и достоверности полученных научных результатов

Анализ экспериментальных данных проводился с использованием широко известной программы ROOT [8] и программного пакета Geant4. Достоверность результатов анализа экспериментальных данных была обусловлена применением методики измерения дифференциальных сечений реакций, первоначально протестированной на более легких изотопах бериллия и бора, показавшей хорошее согласие значений ширин импульсных спектров фрагментов как с другими мировыми данными, так и с теоретическими предсказаниями. Результаты работы опубликованы в реферируемых научных журналах и апробированы на профильных научных конференциях и семинарах.

#### Основные положения, выносимые на защиту

- 1. Результаты анализа данных по поиску фрагментов, образующихся при перезарядке нуклонов, полученные в рамках эксперимента ФРАГМ на ускорительном комплексе ТВН при фрагментации ядер углерода с энергией 300 МэВ/нуклон на бериллиевой мишени;
- Результаты измерения импульсных спектров изотопов бора и бериллия с помощью расширенного метода идентификации фрагментов, основанного на анализе координатной информации полученной с помощью годоскопической системы;
- 3. Результаты расчета эффективности регистрации ионов бериллия и бора и ее импульсной зависимости с помощью программного пакета Geant4;
- 4. Результаты измерений дифференциальных сечений рождения <sup>11</sup>Ве и <sup>12</sup>В (однократная перезарядка) и <sup>12</sup>Ве (двукратная перезарядка) в зависимости от импульса фрагмента;
- 5. Результаты по поиску изотопа <sup>12</sup>N, стабильность состояния которого зависит от угла вылета фрагмента по отношению к налетающему углу;
- 6. Результаты сравнения экспериментальных данных с предсказаниями трех моделей ядро-ядерных взаимодействий: ВС [9], QMD [10], INCL [11];
- 7. Результаты сравнения экспериментальных данных с предсказаниями статистических моделей (Гольдхабера [12] и периферической [13]), а также с другими экспериментальными данными по фрагментации ядра углерода.

#### Личный вклад автора

- Автор внес определяющий вклад в процесс анализа экспериментальных данных, методику обработки и получение конечных физических результатов по сечениям выходов изотопов бериллия и бора, родившихся в реакциях с перезарядкой нуклонов;
- Им была разработана методика обработки данных с использованием информации, получаемой с годоскопической системы, что позволило улучшить описание формы импульсных спектров фрагментов с точностью до 0.4% за счет добавочных измерений;
- Автором был проведен расчет эффективности регистрации изотопов бериллия и бора, регистрируемых экспериментальным детектором ФРАГМ в зависимости от их импульса;
- Автором произведено сравнение экспериментальных данных с предсказаниями нескольких моделей ядро-ядерных взаимодействий. В работе тестировалась согласованность модельных и экспериментальных данных, как в случае обычных фрагментационных процессов, так и для зарядово-обменных реакций;

Были получены дифференциальные сечения рождения изотопов бериллия и бора реакций, идущих с перезарядкой нуклонов, исследована форма ДЛЯ экспериментальных спектров, проведено сравнение теоретическими с предсказаниями, полученными на основании статистических моделей фрагментации, и другими экспериментальными данными по фрагментации углерода.

#### Апробация работы

Полученные результаты были представлены автором на конференциях, в том числе двух международных. Содержание работы отражено в 3 публикациях в журналах, рекомендованных ВАК РФ, а также опубликовано в материалах и тезисах 4 конференций.

#### Объем и структура работы

Диссертация состоит из шести глав, введения, заключения и приложения. Полный объем диссертации составляет 110 страниц текста с 35 рисунками и 5 таблицами. Список используемой литературы содержит 139 библиографических ссылок.

#### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Bo Введении формулируются цель диссертации, обосновывается выбранной актуальность темы, перечисляются задачи исследования; аргументируются использованные методы; определяются научная новизна, теоретическая значимость и практическая ценность результатов исследования, личный вклад автора, а также положения, выносимые на защиту. В конце введения раскрывается структура диссертационной работы, дается перечень ее структурных элементов и обосновывается последовательность их расположения.

В первой главе описывается ускорительно-накопительный комплекс ТВН, даются его характеристики и приводятся статистические данные по его Перечисляются эксперименты в области фундаментальных эксплуатации. исследований, проведенные на данном ускорительном комплексе. Подробно описывается экспериментальная установка ФРАГМ, на которой проводилось исследование, представленное в диссертации. Установка предназначалась для регистрации ядерных фрагментов, рожденных на внутренней мишени ускорительного комплекса. Экспериментальная установка представляла собой двухплечевой магнито-оптический канал длиной 42 м, расположенный под углом в 3.5° по отношению к пучку ускорителя. В первом и втором фокусе канала были размещены сцинтилляционные счетчики. Эти счетчики использовались для измерения амплитуды сигнала и времени пролета. Совпадение сигналов двух счетчиков в разных фокусах использовалось в качестве триггера для считывания и записи информации. В первом фокусе также был расположен годоскоп, который

7

состоял из двадцати вертикальных и восьми горизонтальных элементов размером  $20 \times 1 \times 1$  см<sup>3</sup>, который предназначался для измерения профиля пучка и для уточнения импульса фрагмента с учетом фокусирующих свойств магнитооптического канала. В качестве мишени, расположенной в вакуумной камере ускорителя, использовалась узкая вертикальная бериллиевая фольга толщиной 50 мкм. Мониторинг исходного пучка осуществлялся с помощью трех сцинтилляционных счетчиков, направленных на мишень под углом 2°.

Во второй главе дается обзор экспериментальных работ, посвященных зарядово-обменным реакциям. Отмечено, что при низких энергиях изучается квазиупругое взаимодействие нуклонов, обусловленное виртуальным обменом заряженными мезонами между ядром-снарядом и мишенью. Обычно объектом поиска являются различные ядерные возбуждения (Гамов-Теллеровское, спиндипольное, квадрупольное и др.), а также их зависимость от атомного номера [14]. При более высоких энергиях образуются барионные резонансы с их последующим распадом и испусканием ядерной материей заряженных мезонов.



**Рис.1**. Графическое представление процессов квазиупругого взаимодействия нуклонов ядра-снаряда  $(N_p)$  и мишени  $(N_t)$  (*a* и *б*) и неупругого канала, сопровождающегося образованием  $\Delta$ -изобары (*в* и *г*) [15].

Фактически происходит взаимодействие протонов и нейтронов на периферии ядра по двум каналам: квазиупругому и неупругому (см. рис. 1); последний сопровождается рождением резонансных состояний [15].

Теоретическое описание процесса возникновения резонансных состояний в возбужденной ядерной среде до сих пор вызывает напряженные дискуссии и остается фундаментальной проблемой в физике адронов. Данные о свойствах резонансных состояний и их распадах как в случае протонной, так и ядерной мишеней имеют важное значение для проверки теоретических моделей, описывающих структуру ядерной материи. Следует отметить, что в нашем случае, при кинетической энергии налетающего ядра 300 МэВ/нуклон, основной вклад дает квазиупругий процесс, и выход мезонов является незначительным.

**В третьей главе** приводится краткое описание широко используемых моделей ядро-ядерных взаимодействий. Сравнение модельных предсказаний с полученными экспериментальными данными является одной из главных задач работы. Рассматривались четыре модели, для каждой из них было разыграно 10<sup>8</sup> ядро-ядерных взаимодействий.

Модель бинарного каскада ВС представляет собой гибрид классического внутриядерного каскада и квантовой молекулярной динамики QMD для неупругого рассеяния пионов, протонов и нейтронов, а также легких ионов на ядре. В данной модели ядро формируется из отдельных нуклонов, связанных друг с другом ядерным потенциалом. Бинарные столкновения налетающего ядра или составных и вторичных частиц ядра с одиночными нуклонами, образование резонансов и их распады моделируются в соответствии с измеренными сечениями. Кроме того, модель ВС использует сложную трехмерную модель атомного ядра. Модель имеет существенное ограничение по типу взаимодействующих ядер и хорошо согласуется с экспериментом только для легких ядер.

Модель квантовой молекулярной динамики является квантовым продолжением классической модели молекулярной динамики И обычно применяется для описания ядерных взаимодействий с тяжелыми ядрами. Данные взаимодействия сопровождаются образованием сразу нескольких сложных фрагментов. В модели QMD каждый нуклон обладает собственной волновой функцией, а полная волновая функция системы считается их прямым произведением. Происходит взаимодействие между участниками. В отличие от модели BC, где частицы отслеживаются последовательно, в модели QMD не существует такого понятия, как спектатор, и все частицы в системе отслеживаются одновременно и поэтому вместе с временной эволюцией системы динамически изменяется и ее потенциал.

Модель Льежского внутриядерного каскада INCL была создана для описания взаимодействия пучка ядер углерода с ядерным веществом при промежуточных энергиях, что важно, в частности, для целей медицинской физики. В основе ее лежит классическая модель внутриядерного каскада. Внутри ядра происходит бинарное столкновение между нуклонами, причем возможны как неупругие процессы, так и образование барионных резонансов с их последующим распадом. В принципе данная модель схожа по своим основным принципам с моделью BC и также обладает некоторыми ограничениями. В частности, модель

9



**Рис. 2.** Зависимость импульса от угла для  ${}^{12}$ В, родившегося в зарядово-обменной реакции, для трех моделей ядро-ядерных взаимодействий: ВС (*a*), INCL (*б*) и QMD (*в*). Вертикальные линии отображают угловой захват детектора ФРАГМ.

INCL налагает ограничение на ядро-снаряд, его атомная масса должна удовлетворять условию *A* < 18, для мишени такого требования не существует.

Четвертая исследуемая модель — это Лос-Аламосская кварк-глюонная струнная модель (LAQGSM) [16]. Она описывается трехступенчатым процессом: внутриядерным каскадом, предравновесной эмиссией частиц из возбужденного остаточного ядра, образованного во внутриядерном каскаде, и процессом испарения или деления составного ядра. Таким образом, модель представляет собой многоступенчатый алгоритм, составные части которого находятся в постоянном процессе модификации разными разработчиками. Модель создана для описания ядро-ядерных взаимодействий с энергиями до 1 ТэВ/нуклон и применима для всех типов ядер. После краткого теоретического описания моделей приводится их сравнение на примере двумерного распределения зависимости импульса от угла для изотопа <sup>12</sup>В (рис. 2), родившегося в зарядово-обменной реакции.

Модели по-разному описывают выходы изотопа <sup>12</sup>В, кроме того, модель LAQGSM не воспроизводит реакции, идущие с перезарядкой нуклонов [1А]. Видно, что модель ВС дает наибольший выход ядра <sup>12</sup>В в области углового захвата

детектора ФРАГМ, которая отмечена на рисунке двумя вертикальными линиями, в то время как выход этого изотопа для моделей INCL и QMD существенным образом подавлен.

В четвертой главе описывается этап моделирования процесса прохождения заряженных частиц через детектор ФРАГМ. Магнито-оптический канал установки ФРАГМ обладает рядом конструкционных особенностей, он содержит заглушки, коллиматоры, счетчики, имеется разрыв вакуумопровода в районе счетчиков и т.д. Поэтому при транспортировке пучка частиц через канал необходимо учитывать такие процессы, как многократное рассеяние, ионизационные потери и неупругое взаимодействие частиц со средой, которые влияют на изменение формы импульсного спектра исследуемых частиц и могут привести к их выбыванию из канала. Также необходимо определить такие важные параметры установки, используемые при физическом анализе экспериментальных данных, как импульсный и угловой захват. Для решения этих задач была использована созданная ранее программа *Tracer* [17], на основе программного пакета Geant4. В работе приводится описание этой программы моделирования, которая используется как для визуализации событий, так и для вычислений. В режиме просмотра событий функционал программы позволяет строить изображение определенного вида экспериментальной установки, задает И отображает проведение определенного числа заряженных частиц в канале.

Режим вычислений необходим для обработки значительного объема информации. Необходимая информация в конце счета сохраняется в формате ROOT в виде гистограмм и специального контейнера данных, называемого деревом, что также позволяет осуществлять анализ данных в рамках объектноориентированного программирования на базе языка C++.

Программа позволила определить основные физические параметры магнитооптического канала. На рис. З показано импульсное распределение, которое было определено при настройке канала на импульс 1 ГэВ/с. Из рисунка видно, что максимальный разброс импульса, который можно назвать импульсным захватом установки, составляет  $\Delta p/p = \pm 3.5\%$ . Угловой захват установки был вычислен с помощью моделирования для протонов при прохождении частицы из области мишени до второго фокуса, при этом розыгрыш начального направления частицы был осуществлен равномерно по соs  $\theta$ , где  $\theta$  – угол рождения фрагмента относительно исходного пучка. Угол захвата составляет  $\Delta \theta = \pm 0.5^\circ$  по отношению

к углу расположения установки в  $3.5^{\circ}$ .



**Рис. 3.** Импульсный захват детектора ФРАГМ. На графике представлена эффективность регистрации протонов при настройке магнито-оптического канала на импульс 1 ГэВ/*c*.

Моделирование магнито-оптического канала установки ФРАГМ также позволило рассчитать эффективность регистрации ионов. На рис. 4 показаны результаты расчёта эффективности регистрации протонов и изотопов бора (<sup>8</sup>B, <sup>10</sup>B, <sup>11</sup>B и <sup>12</sup>B) в зависимости от жесткости канала x = p/Z, где p и Z – импульс и заряд фрагмента [1А]. Данные описываются функцией:

$$f(x) = p_2 \times \exp\left[-\frac{p_0}{(x - p_1)^2}\right],$$

где  $p_0$ ,  $p_1$ ,  $p_2$  – свободные параметры. При жесткости в диапазоне от 0.3 ГэВ/*c* до 3 ГэВ/*c* поправка на эффективность может значительно изменить спектр ионов.



**Рис. 4.** Эффективности регистрации протонов и ионов бора магнито-оптическим каналом детектора ФРАГМ в зависимости от настроек жесткости канала.

Можно заметить, что эффективность регистрации протонов в этой области примерно на 20 % больше, чем для других изотопов. На эффективность регистрации протонов и ионов повлияли такие процессы, как многократное рассеяние, ионизационные потери и неупругое взаимодействие частиц со средой, вызванные конструкционными особенностями детектора ФРАГМ.

В пятой главе представлена разработанная автором методика поиска ядер <sup>11</sup>Ве, <sup>12</sup>В, <sup>12</sup>Ве и <sup>12</sup>N, а также измерения дифференциальных сечений рождения фрагментов  $d^2\sigma/(d\Omega dp)$  в широком импульсном интервале. При получении сечений измеренные импульсные распределения нормируются по показаниям монитора, определяющего поток исходных ионов углерода, на эффективность регистрации соответствующих фрагментов, a также полное сечение взаимодействия ионов углерода с бериллием  $\sigma_{tot}$ . Величина данного сечения, LAQGSM, 772.8 вычисленная В рамках модели равна мбн при энергии 300 МэВ/нуклон и в пределах 0.5% согласуется с теоретическим расчетом (*σ*<sub>tot</sub> = 776.8 мбн) [18].

Поиск изотопа <sup>11</sup>Ве происходил при настройке магнито-оптического канала на жесткость в диапазоне от 2.0 до  $2.25 \ \Gamma \Rightarrow B/c$ , с шагом сканирования 50 М $\Rightarrow B/c$ . По результатам каждого сканирования строились соответствующие корреляционные распределения времени пролета (каналы TDC) и амплитуды сигнала (каналы QDC) (см. рис. 5) [2A].

На первом этапе выделялись события в области рождения изотопа <sup>11</sup>Ве по каналам QDC, которая задавалась двумя наклонными линиями. Наклон линий одинаков при разных жесткостях. Затем отобранные события проектировались на ось времени или, для улучшения импульсной точности, исследовалась информация, поступившая с годоскопической системы.

Центральная ячейка годоскопа соответствует номинальной жесткости магнито-оптического канала. Каждая настройка канала дает добавочные измерения, соответствующие определенной ячейке годоскопа, следовательно, можно переопределить номер ячейки в значения жесткости. При этом точность измерения импульса фрагмента улучшается до 0.4%.



**Рис. 5**. Методика отбора <sup>11</sup>Ве. Корреляционные распределения времени пролета (каналы TDC) и амплитуды сигнала (каналы QDC) при различных настройках магнито-оптического канала по жесткости (p/Z).



**Рис. 6**. Распределение событий по ячейкам годоскопа, отобранных по корреляционному распределению в области регистрации изотопа <sup>11</sup>Ве. Красной линией представлена подгонка данных суммой двух распределений Гаусса.

Распределение по ячейкам годоскопического счетчика приведено на рис. 6. На графиках можно заметить два максимума, левый пик связан с искомым ядром <sup>11</sup>Ве, а правый образован изотопом <sup>10</sup>Ве и является фоновым вкладом, который становится существенным при малых жесткостях. Фоновая часть вычитается из гистограммы, которая затем соответствует сигналу от изотопа <sup>11</sup>Ве. Для определения выходов искомых фрагментов суммируются измерения из разных настроек канала.

Поиск фрагментов, соответствующих  ${}^{12}$ В, осуществлялся при жесткости в диапазоне от 1.75 до 1.95 ГэВ/*с*. Алгоритм выделения этого изотопа работает по аналогии с поиском ядра  ${}^{11}$ Ве, описанным выше [1А, 2А].

Корреляционное распределение при жесткости в 1.8 ГэВ/с показано на рис. 7 (*a*), на графике хорошо виден сигнал от изотопа <sup>12</sup>В, отбор которого был осуществлен с помощью двух наклонных кривых. Распределение по номеру сработавшей ячейки годоскопического счетчика приведено на рис. 7 ( $\delta$ ) при отборе фрагментов по времени пролета в интервале от 425 до 445 канала. Фоновые события дают ионы <sup>11</sup>В, которые были удалены при помощи подгоночной функции (см. рис. 7 ( $\epsilon$ )).



**Рис. 7.** Алгоритм выделения ядра <sup>12</sup>В при жесткости канала 1.8 ГэВ/*c*: корреляционное распределение времени пролета (TDC) и амплитуды сигнала (QDC) (*a*); распределения по номеру ячейки годоскопического счетчика ( $\delta$ ) и по каналам TDC (*в*), полученные по отобранным событиям из выделенной области корреляционного распределения, определенной двумя косыми линиями.

Можно заметить, что различие в максимальных значениях сигнала и фона составляет один порядок величины, что также указывает на то, что процесс,

проходящий с перезарядкой нуклонов, является менее вероятным, чем обычные рождение изотопов в процессе фрагментация ядра.

Рассчитанные дифференциальные сечения рождения ядер <sup>11</sup>Ве и <sup>12</sup>В в зависимости от импульса приведены на рис. 8. Экспериментальные данные приводятся в сравнении с аналогичными спектрами, полученными в рамках моделей ядро-ядерных взаимодействий ВС, INCL и QMD. Рассчитанные сечения приблизительно на два порядка меньше величины сечений выхода других изотопов, образующихся без зарядового обмена.



**Рис. 8.** Дифференциальные сечения рождения ионов <sup>11</sup>Ве (*a*) и <sup>12</sup>В (*б*) для экспериментальных данных и моделей ион-ионного взаимодействия в зависимости от импульса фрагмента.

Экспериментальные формы распределений изотопов  $^{12}$ B и  $^{11}$ Be имеют гауссову форму с более узким спектром, шириной около 100 - 150 МэB/*c*, по сравнению с рождением ионов бора и бериллия, которые образовались без перезарядки. Соответствующие максимумы спектров отвечают квазиупругому процессу рождения фрагментов. Низкоэнергетический вклад в измеренные спектры, связанный с рождением реальных пионов, является незначительным для реакций с однократной перезарядкой.

Как видно из распределений, модели ВС и QMD удовлетворительно согласуются с экспериментом по среднему значению и ширине спектра, однако расходятся по абсолютным значениям с экспериментальными данными. Модель INCL не описывает характерный пик, определяющий однократную перезарядку нуклонов, и предсказывает лишь низкоэнергетическую часть импульсного распределения.

Далее в диссертации описывается алгоритм поиска изотопа <sup>12</sup>N. Образование изотопов <sup>12</sup>N является зеркальным по отношению к ядру <sup>12</sup>B при фрагментации ионов углерода. Поэтому можно ожидать, что сечения образования этих изотопов должны быть одинаковыми. Однако вероятность обмена положительным зарядом между мишенью и налетающим ядром углерода меньше вероятности обмена отрицательным зарядом, так как в бериллиевой мишени протонов меньше, чем нейтронов. Это дополнительно снижает вероятность образования ядер <sup>12</sup>N.

Отбор изотопов <sup>12</sup>N был осуществлен по корреляционным распределениям в переменных времени пролета и заряда в области от 1.25 до 1.50 ГэВ/*c*, что обеспечивает максимальный выход изотопа. Амплитуда, выраженная через заряд, позволяет выровнять сигналы от фрагментов с одинаковым зарядом и сделать процедуру отбора ионов более легкой. Соответствующий метод был разработан автором. Отбирались события, попавшие в область зарядового числа 7. По переменной TDC – в диапазоне  $\pm$  5 каналов (1 нс) от вычисленного времени пролета при заданной жесткости.

Для ионов <sup>12</sup>N, больший угол многократного рассеяния и большие ионизационные потери в сцинтилляторах первого фокуса приводят к меньшему захвату этих ионов второй ступенью магнито-оптического канала. Коэффициент подавления выхода ядра <sup>12</sup>N по отношению к ядру <sup>12</sup>B вычислялся при импульсе, соответствующему максимуму выхода изотопа <sup>12</sup>B, и составил около 7.

Таким образом, можно утверждать, что вероятность образования основного состояния ядер <sup>12</sup>N составляет не более 1/7 от всех состояний этого изотопа. Данное сравнение показано на рис. 9.



**Рис. 9.** Сравнительное соотношение выходов изотопа  ${}^{12}$ В и возможного выхода основного состояния ядра  ${}^{12}$ N для оценки верхнего предела на регистрацию  ${}^{12}$ N экспериментальной установкой.

После перечисления исследуемых процессов, проходящих с однократной перезарядкой нуклонов, в главе 5 рассматривается поиск фрагментов, идущих с двукратной перезарядкой нуклонов. Описывается алгоритм поиска изотопа <sup>12</sup>Ве [3А]. Он был проведен при настройке магнито-оптического канала на диапазон жесткостей от 2.15 до 2.45 ГэВ/с. Были построены корреляционные зависимости времени пролета и заряда. По результатам анализа данных было определено, что сигнал от изотопа <sup>12</sup>Ве хорошо отображается для жесткости 2.20ГэВ/с и 2.40 ГэВ/с, причем в области от 2.25 до 2.35 ГэВ/с он отсутствует. Это обстоятельство говорит о разделении максимума в импульсном спектре на два. Дифференциальное сечение рождения изотопа <sup>12</sup>Ве вычисляется аналогичным образом, как и в случае реакций, идущих с однократной перезарядкой. Это дифференциальное сечение представлено на рис. 10 в сравнении с предсказаниями трех моделей ион-ионного взаимодействия. Первый максимум, расположенный в районе импульса  $p \sim 9.5 \ \Gamma \Rightarrow B/c$ , соответствует рождению двух виртуальных пионов [2А]. Второй максимум, низкоэнергетический, имеет большую статистическую значимость. Он соответствует рождению одного виртуального и одного реального пиона, что также подтверждается моделями ВС и INCL.

Те же два пика предсказывает модель бинарного каскада, а остальные модели предсказывают лишь один из пиков. Модель QMD отображает основной пик зарядово-обменных реакций, однако существенно занижает вклад от рождения реальных пионов. Модель INCL достоверно описывает лишь низкоэнергетический пик.



**Рис.** 10. Дифференциальные сечения рождения изотопа <sup>12</sup>Ве для экспериментальных данных и моделей ион-ионного взаимодействия в зависимости от импульса фрагмента.

В шестой главе проведен сравнительный анализ экспериментально полученных дифференциальных сечений для изотопов бериллия и бора с предсказаниями статистических моделей фрагментации. Такие модели основаны на предположении, что импульсные распределения фрагментов в системе покоя налетающего ядра и регистрируемые под нулевым углом к исходному пучку, хорошо описываются распределением Гаусса. Модель Гольдхабера [12] была предложена для описания импульсных распределений при фрагментации налетающего ядра-снаряда, полученных в периферических столкновениях с тяжелыми ядрами мишени. Ширина спектра в данной модели определяется по формуле:

$$\sigma_{||}^2 = rac{A_f(A_p - A_f)}{A_p - 1} < p_i^2 >,$$

где  $A_p$  и  $A_f$  — массовые числа налетающего ядра и фрагмента,  $p_i$  – импульс нуклона в ядре. Величину  $< p_i^2 >$  можно оценить по модели Ферми-газа для нуклонов [19]. В этом случае:  $< p_i^2 > = 3p_F^2/5$ , причем в формуле следует заменить  $< p_i^2 >$  на  $\sigma_0^2$ , где:

$$\sigma_0^2 = < p_i^2 > /3 = p_F^2 / 5$$

Формула предсказывает параболическую зависимость  $\sigma_{||}$  от массового числа фрагмента с максимумом при  $A_f = A_p / 2$ .

Для сравнения экспериментальных данных с предсказаниями моделей необходимо ввести две поправки на ширину распределений, вычисленных в

системе покоя налетающего ядра. Первая поправка связана с импульсным разрешением установки, которая составляет 1.5% по импульсу в случае измерений без использования годоскопической системы, и 0.4% для реакций, идущих с перезарядкой нуклонов и измеренных с использованием годоскопа. Вторая поправка связана с приведением экспериментальной ширины к нулевому углу. Данный пересчет был осуществлен в рамках модели ВС, поправочный коэффициент различен для разных фрагментов.

В табл. 1 приведены измеренные данные по ширинам  $\sigma^{\Phi PA\Gamma M}$ , в том числе приведенные к нулевому углу  $\sigma_{\parallel}^{\Phi PA\Gamma M}$ , в сравнении с аналогичными данными ( $\sigma_{\parallel}^{\mathfrak{skcn.}}$ ) [20], где рассматривалась фрагментация ионов углерода с энергией 2.1 ГэВ/нуклон на бериллиевой мишени. Там же приведены ширины спектров, полученные по формуле Гольдхабера ( $\sigma_{\parallel}^{\mathrm{reop1}}$ ) и рассчитанные в рамках статистической периферической модели ( $\sigma_{\parallel}^{\mathrm{reop2}}$ ). Экспериментальные значения  $\sigma_{\parallel}^{\Phi PA\Gamma M}$  в целом согласуются с ширинами, полученными в рамках теоретических расчетов. В случае изотопа <sup>12</sup>В теоретические предсказания не применимы, но  $\sigma_{\parallel}^{\Phi PA\Gamma M}$  и  $\sigma_{\parallel}^{\mathfrak{skcn.}}$  находятся в хорошем согласии в пределах ошибок [1А].

| Изотоп            | σ <sup>ΦΡΑΓΜ</sup> , | $\sigma_{\parallel}^{\Phi PA\Gamma M}$ , | σ∥ <sup>эксп.</sup> , | $\sigma_{\parallel}^{\text{reop1}}$ , | $\sigma_{\parallel}^{\text{reop2}}$ , |
|-------------------|----------------------|--|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
|                   | Mэ $B/c$             | МэВ/с                                    | МэВ/с                 | МэВ/с                                 | МэВ/с                                 |
| <sup>7</sup> Be   | $202.7\pm1.8$        | $167.9\pm5.6$                            | $145 \pm 2$           | 183                                   | 143                                   |
| <sup>9</sup> Be   | $178.5\pm1.6$        | $136.6\pm6.6$                            | $133 \pm 3$           | 161                                   | 128                                   |
| <sup>10</sup> Be  | $207.5\pm0.6$        | $131.3\pm5.5$                            | $129\pm4$             | 138                                   | 124                                   |
| <sup>11</sup> Be  | $148.0\pm7.9$        | $111.4\pm13.1$                           | $155 \pm 4$           | 103                                   | 123                                   |
| <sup>8</sup> B    | $213.4\pm3.3$        | $180.2 \pm 5.8$                          | $151 \pm 16$          | 175                                   | 154                                   |
| $^{10}\mathbf{B}$ | $206.4\pm3.6$        | $132.9\pm6.1$                            | $134 \pm 3$           | 138                                   | 120                                   |
| $^{11}$ <b>B</b>  | $162.0\pm2.0$        | $100.1\pm7.4$                            | $106 \pm 4$           | 103                                   | 102                                   |
| $^{12}\mathbf{B}$ | $91.38\pm3.0$        | $54.8\pm4.35$                            | $63\pm9$              | —                                     | _                                     |

**Табл.1.** Измеренные ширины (среднеквадратичные отклонения) для изотопов бериллия и бора.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа посвящена обработке результатов экспериментальных измерений процессов фрагментации ионов углерода, идущих с перезарядкой нуклонов, при энергии 300 МэВ/нуклон, полученных на детекторе ФРАГМ на ускорителе ТВН.

В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие результаты:

1. Проделан целенаправленный, высоко статистически обеспеченный поиск процессов, идущих с перезарядкой нуклонов, при фрагментации ядер <sup>12</sup>С на

бериллиевой мишени. Экспериментальные данные были получены в лаборатории адронной физики НИЦ «Курчатовский институт» на магнитооптическом канале детектора ФРАГМ на тяжелоионном ускорительном комплексе ТВН при энергии 300 МэВ/нуклон.

- 2. Был проведен первоначальный отбор фрагментов при анализе корреляционных распределений времени пролета и амплитуды сигнала при различных настройках магнито-оптического канала по жесткости. Была разработана методика улучшения точности измеряемого импульса с помощью информации, поступившей с годоскопической системы детектора ФРАГМ. Данная процедура позволила улучшить точность измерения импульса до 0.4%, что необходимо для получения приемлемой формы спектров реакций, идущих с перезарядкой нуклонов.
- Было проведено моделирование прохождения пучка ионов в магнитооптическом канале детектора ФРАГМ. Данная процедура позволила рассчитать основные физические параметры детектора, а также эффективность установки к фрагментам в зависимости от их импульса.
- 4. Были обнаружены изотопы <sup>11</sup>Ве и <sup>12</sup>В, образующиеся в результате однократной перезарядки нуклонов. Также был измерен выход изотопа <sup>12</sup>Ве, родившегося в процессе двойной перезарядки. Были получены дифференциальные сечения рождения изотопов в зависимости от их импульса. Эти сечения оказались на два порядка меньше сечений выхода изотопов, образующихся без зарядового обмена.
- 5. Была произведена оценка верхнего предела выхода изотопа <sup>12</sup>N, который определялся по отношению к выходу изотопа <sup>12</sup>B.
- 6. Были протестированы три модели ядро-ядерных взаимодействий: бинарного (BC) и внутриядерного (INCL) каскадов, а также квантовой молекулярнодинамической модели (QMD). Проведенное сравнение полученных данных с предсказаниями моделей показало различие в описании формы импульсных спектров для различных моделей, в том числе различие с экспериментом. В частности, модель INCL не воспроизводит квазиупругий пик зарядовообменных реакций, модель BC наилучшим образом воспроизводит экспериментов.
- 7. Была проведена оценка формы измеренных импульсных спектров бериллия и бора (<sup>7</sup>Be, <sup>9</sup>Be, <sup>10</sup>Be, <sup>11</sup>Be, <sup>8</sup>B, <sup>10</sup>B, <sup>11</sup>B, <sup>12</sup>B) по ширине распределения в системе покоя налетающего ядра. Экспериментальные ширины сравнивались с предсказаниями, полученными в рамках модели Гольдхабера и периферической модели, а также с аналогичными данными по фрагментации <sup>12</sup>C. В целом, экспериментальные данные хорошо согласуются в пределах ошибок с моделями

и другими данными по фрагментации. Однако, эти модели не предсказывают ширины квазиупругого пика в зарядово-обменных реакциях.

Полученные результаты по дифференциальным сечениям расширяют базу данных по слабо изученным процессам фрагментации ядер, идущим с перезарядкой нуклонов, и предоставляют новый материал для тестирования моделей ядро-ядерных взаимодействий.

#### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

- 1А. А. Куликовская, Б. М. Абрамов, Ю. А. Бородин, С. А. Булычёв, И. А. Духовской, А. П. Крутенкова, В. В. Куликов, М. А. Мартемьянов, М. А. Мацюк, Е. Н. Турдакина. Поиск процессов перезарядки нуклонов в фрагментации ионов углерода при энергии 300 МэВ/нуклон, *ЯФ*, Т. 85, №5, 339 (2022). [А. А. Kulikovskaya, В. М. Abramov, Yu. A. Borodin, S. A. Bulychjov, I. A. Dukhovskoy, A. P. Krutenkova, V. V. Kulikov, M. A. Martemianov, M. A. Matsyuk, E. N. Turdakina. Search for Nucleon Charge–Exchange Processes in the Fragmentation of Carbon Ions at an Energy of 300 MeV per Nucleon, *Phys. At. Nucl.* 85, № 5, 466 (2022)]. DOI: 10.1134/S1063778822050076.
- 2A. B. M. Abramov, Yu. A. Borodin, S. A. Bulychjov, I. A. Dukhovskoy, A. P. Krutenkova, V. V. Kulikov, A. A. Kulikovskaya, M. A. Martemianov, M. A. Matsyuk, E. N. Turdakina. Ion Identification Using a FRAGM Magnetic Spectrometer, *Phys. At. Nucl.* 85, № 9, 1541 (2022). DOI: 10.1134/S1063778822090010.
- ЗА. А. А. Куликовская, Б. М. Абрамов, Ю. А. Бородин, С. А. Булычев, И. А. Духовской, А. П. Крутенкова, В. В. Куликов, М. А. Мартемьянов, М. А. Мацюк, Е. Н. Турдакина. Процессы перезарядки при фрагментации ионов углерода при энергии 300 МэВ/нуклон: сравнение с моделями ион-ионных взаимодействий, *Из6. РАН. Сер. физ.*, Т. 87, № 8, 1130 (2023). [А. А. Kulikovskaya, В. М. Abramov, Yu. A. Borodin, S. A. Bulychjov, I. A. Dukhovskoy, A. P. Krutenkova, V. V. Kulikov, M. A. Martemianov, M. A. Matsyuk, E. N. Turdakina. Charge Exchange upon the Fragmentation of Carbon Ions at an Energy of 300 MeV/Nucleon: Comparing Models of Ion–Ion Interaction, *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* 87, № 8, 1147 (2023)] DOI: 10.3103/S1062873823703008.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 4 конференциях и молодежных школах:

 Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике (МКТЭФ–2021), 15 – 18 ноября 2021, Москва, Россия. Исследование процессов фрагментации ионов углерода с однократной перезарядкой нуклонов при энергии 300 МэВ/нуклон. Сборник аннотаций докладов, ФГБУ «ИТЭФ им. А. И. Алиханова НИЦ «Курчатовский институт», Москва, 52 (2021). Секционный доклад, представлен Куликовской А. А.

- LXXII International conference Nucleus-2022: Fundamental problems and applications, 11 – 16 July 2022, Moscow, Russia. Charge exchange processes in carbon ions fragmentation at 300 MeV/nucleon: a comparison with models of ion-ion interactions. Book of Abstracts, Edited by K. A. Stopani and N. S. Zelenskaya, Amirit, Saratov, 148 (2022); https://events.sinp.msu.ru/event/8/attachments/181/875/ nucleus-2022-book-of-abstracts-www.pdf. Секционный доклад, представлен Куликовской А. А.
- 6th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2022), 29 November – 2 December 2022, Moscow, Russia. Single and double charge exchange reactions in <sup>12</sup>C fragmentation at 300 MeV/nucleon. Секционный доклад, представлен Куликовской А. А.
- 4. XVII Курчатовская молодежная школа, 20 23 марта 2023 г., Москва, Россия. Рождение <sup>12</sup>B, <sup>12</sup>N и <sup>12</sup>Be в зарядово-обменных реакциях. Сборник Аннотаций, НИЦ «Курчатовский институт», 304 (2023). Секционный доклад, представлен Куликовской А. А.

#### Список литературы

- [1] Б. М. Абрамов П. Н. Алексеев, Ю. А. Бородин *и др.*, Протоны от фрагментации ионов углерода при 0.3–2.0 ГэВ/нуклон: сравнение с моделями ион-ионных взаимодействий, ЯФ, Т. 78, № 5, 403 (2015).
- [2] Б. М. Абрамов, П. Н. Алексеев, Ю. А. Бородин *и др.*, Проявление кварковых кластеров в образовании кумулятивных протонов в эксперименте по фрагментации ионов углерода, Письма в ЖЭТФ, Т. 97, № 7–8, 509 (2013).
- [3] Б. М. Абрамов, П. Н. Алексеев, Ю. А. Бородин и др., Выходы ядерных фрагментов во взаимодействиях ядер углерода с бериллиевой мишенью при 0.6 ГэВ/нуклон, ЯФ, Т. 79, № 5, 475 (2016).
- [4] Н. Н. Алексеев, А. А. Голубев, Б. Ю. Шарков, Развитие ускорительных технологий в ИТЭФ, Научные исследования и разработки НИЦ «Курчатовский институт» ИТЭФ, Сборник статей, Москва (2019).
- [5] D. Frekers, M. Alanssari, Charge-exchange reactions and the quest for resolution, Eur. Phys. J. A 54, 177 (2018).
- [6] T. Saito, H. Ekawa, M. Nakagawa, Novel method for producing very-neutron-rich hypernuclei via charge-exchange reactions with heavy ion projectiles, Eur. Phys. J. A 57, 159 (2021).
- [7] S. Agostinelli J. Allison, K. Amako *et al.* Geant4 a simulation toolkit, *Nucl. Instrum. Meth. A* 506, 250 (2003).

- [8] R. Brun, F. Rademakers, ROOT: An object oriented data analysis framework, Nucl. Instrum. Meth. A 389, 81 (1997); ROOT Manual: <u>https://root.cern/manual/</u>.
- [9] G. Folger, V. N. Ivanchenko, J. P. Wellisch, The Binary Cascade: Nucleon nuclear reaction, *Eur. Phys. J. A* 21, 407 (2004).
- [10] J. Aichelin, 'Quantum' molecular dynamics: A Dynamical microscopic n body approach to investigate fragment formation and the nuclear equation of state in heavy ion collisions, *Phys. Rep.* 202, 233 (1991).
- [11] J. Dudouet, D. Cussol, D. Durand *et al.*, Benchmarking Geant4 nuclear models for hadron therapy with 95 MeV/nucleon carbon ions, *Phys. Rev. C* 89, 054616 (2014).
- [12] A.S. Goldhaber, Statistical models of fragmentation processes, Phys. Lett. B 53, 306 (1974).
- [13] W. A. Friedman, Heavy ion projectile fragmentation: A reexamination, *Phys. Rev.* C 27, 569 (1983).
- [14] Н. К. Скобелев, Ю. Э. Пенионжкевич, В. Бурьян *и др.*, Зарядово-обменные реакции на пучках низкоэнергетических частиц, *Изв. РАН. Сер. физ.*, Т. 84, № 4, 548 (2020).
- [15] L. Rodriguez-Sanchez, J. Benlliure, I. Vidaña *et al.*, Study of Δ excitations in medium-mass nuclei with peripheral heavy ion charge-exchange reactions, *Phys. Lett.* B 807, 135565 (2020).
- [16] S. G. Mashnik, K. K. Gudima, R. E. Prael *et al.*, CEM03.03 and LAQGSM03.03 Event Generators for the MCNP6, MCNPX, and MARS15 Transport Codes, *LANL Report LA-UR-08-2931*, Los Alamos (2008).
- [17] В. В. Куликов, М. А. Мартемьянов, Метод расчёта магнитооптических каналов для установки ФРАГМ, № ТР 1-301-16-03-2017.
- [18] L. Sihver, C. H. Tsao, R. S. Silberberg *et al.*, Total reaction and partial cross-section calculations in proton nucleus ( $Z_t \le 26$ ) and nucleus-nucleus reactions ( $Z_p$  and  $Z_t \le 26$ ), *Phys. Rev. C* 47, 1225 (1993).
- [19] A. Bacquias, V. Föhra, D. Henzlovaa *et al.*, Dispersion of longitudinal momentum distributions induced in fragmentation reactions, *Phys. Rev. C* 85, 024904 (2012).
- [20] D. E. Greiner, P. J. Lindstrom, H. H. Heckman *et al.*, Momentum distributions of isotopes produced by fragmentation of relativistic <sup>12</sup>C and <sup>16</sup>O projectiles, *Phys. Rev. Lett.* 35, 152 (1975).